

10/554/93

Mod. C.E. - 1-4 7

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)



EP04/50595

REC'D 23 AUG 2004

WIPO

PCT

Ministero delle Attività Produttive

Direzione Generale per lo Sviluppo Produttivo e la Competitività

Ufficio Italiano Brevetti e Marchi

Ufficio G2

**Autenticazione di copia di documenti relativi alla domanda di brevetto per:
INVENZIONE INDUSTRIALE N. FI 2003 A 000117 del 24.04.2003**

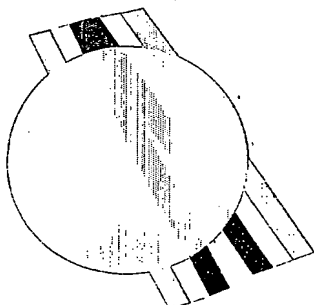
Si dichiara che l'unita copia è conforme ai documenti originali
depositati con la domanda di brevetto sopra specificata, i cui dati
risultano dall'accluso processo verbale di deposito.



Roma, li. 29 LUG. 2004

IL FUNZIONARIO

Giampietro Carlotto



BEST AVAILABLE COPY

AL MINISTERO DELL'INDUSTRIA DEL COMMERCIO E DELL'ARTIGIANATO
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI - ROMA

MODULO A



DOMANDA DI BREVETTO PER INVENZIONE INDUSTRIALE, DEPOSITO RISERVE, ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO

A. RICHIEDENTE (I) **CONSORZIO NAZIONALE INTERUNIVERSITARIO PER LE TELECOMUNICAZIONI (CNIT)** N.S. CO

1) Denominazione **PARMA** codice **01938560347**

Residenza _____

2) Denominazione _____ codice _____

Residenza _____

B. RAPPRESENTANTE DEL RICHIEDENTE PRESSO L'U.I.B.M.
de Benedetti Fabrizio ed altri

cognome nome _____ cod. fiscale _____

denominazione studio di appartenenza **Società Italiana Brevetti S.p.A.**

via **Corso dei Tintori** n. **25** città **FIRENZE** cap **50122** (prov) **FI**

C. DOMICILIO ELETTIVO destinatario _____

via _____ n. _____ città _____ cap _____ (prov) _____

D. TITOLO **PREVENZIONE DEL DEGRADO DELLE PRESTAZIONI IN SISTEMI DI COMUNICAZIONE OTTICA WDM**
IMPIEGANTI AMPLIFICAZIONE RAMAN DISTRIBUITA CONTRO-PROPAGANTE

ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO: SI ☐ NO ☒ SE ISTANZA: DATA _____ N° PROTOCOLLO _____

E. INVENTORI DESIGNATI **SUGLIANI Simone** cognome nome _____

1) _____ 3) _____

2) _____ 4) _____

F. PRIORITÀ

nazione o organizzazione	tipo di priorità	numero di domanda	data di deposito	allegato S/A	SCIOGLIMENTO RISERVE Data N° Protocollo
1) _____	_____	_____	____/____/____	_____	____/____/____
2) _____	_____	_____	____/____/____	_____	____/____/____

G. CENTRO ABILITATO DI RACCOLTA COLTURE DI MICROORGANISMI, denominazione _____

H. ANNOTAZIONI SPECIALI

Nessuna

DOCUMENTAZIONE ALLEGATA

N. az.	Doc. 1)	Doc. 2)	Doc. 3)	Doc. 4)	Doc. 5)	Doc. 6)	Doc. 7)	Descrizione	SCIOGLIMENTO RISERVE Data N° Protocollo
1)	<input checked="" type="checkbox"/> PRIV	n. pag 127	<input checked="" type="checkbox"/> PRIV	n. tav. 197	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	riassunto con disegno principale, descrizione e rivendicazioni (obbligatorio se si allega disegno)	____/____/____
2)	<input checked="" type="checkbox"/> PRIV	n. tav. 197	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	disegno (obbligatorio se citato in descrizione, 1 esemplare)	____/____/____
3)	<input type="checkbox"/> RIS		<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	lettera d'incarico, procura o riferimento procura generale	____/____/____
4)	<input type="checkbox"/> RIS		<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	designazione inventore	____/____/____
5)	<input type="checkbox"/> RIS		<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	documenti di priorità con traduzione in italiano	____/____/____
6)	<input type="checkbox"/> RIS		<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	autorizzazione o atto di cessione	____/____/____
7)	<input type="checkbox"/> RIS		<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	<input type="checkbox"/> RIS	nomativo completo del richiedente	____/____/____

8) attestati di versamento, totale lire **Euro DUECENTONOVANTUNO/80=** (per tre anni) obbligatorio

COMPILATO IL **23/04/2003** FIRMA DEL(I) RICHIEDENTE (I) **Marco Luigi Bardini**

CONTINUA SI/NO **NO** (Società Italiana Brevetti S.p.A.)

DEL PRESENTE ATTO SI RICHIEDE COPIA AUTENTICA SI/NO **SI** (acritto all'Atto con il n. 223)

CAMERA DI COMMERCIO I. A. A. DI **FIRENZE** codice **48**

VERBALE DI DEPOSITO NUMERO DI DOMANDA **FI 2003 A 000117**

l'anno millenovecento **DUEMILTATRE** il giorno **VENTIQUATTRO** del mese di **APRILE**

il(i) richiedente(i) sopraindicato(i) ha(hanno) presentato a me sottoscritto la presente domanda, corredata di n. **00** fogli aggiuntivi per la concessione del brevetto sopraportato.

I. ANNOTAZIONI VARIE DELL'UFFICIALE ROGANTE _____

IL DEPOSITANTE **Autentico** L'UFFICIALE ROGANTE _____



NUMERO DOMANDA |
NUMERO BREVETTO |

REG. A

DATA DI DEPOSITO
DATA DI RILASCIO

D. TITOLO

B 2003 A 000117

PREVENZIONE DEL DEGRADO DELLE PRESTAZIONI IN SISTEMI DI COMUNICAZIONE OTTICA WDM IMPIEGANTI AMPLIFICAZIONE RAMAN
DISTRIBUITA CONTRO-PROPAGANTE

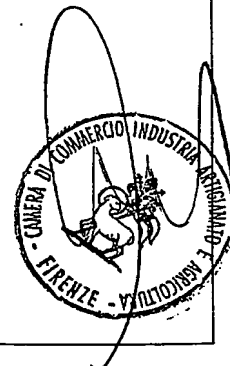
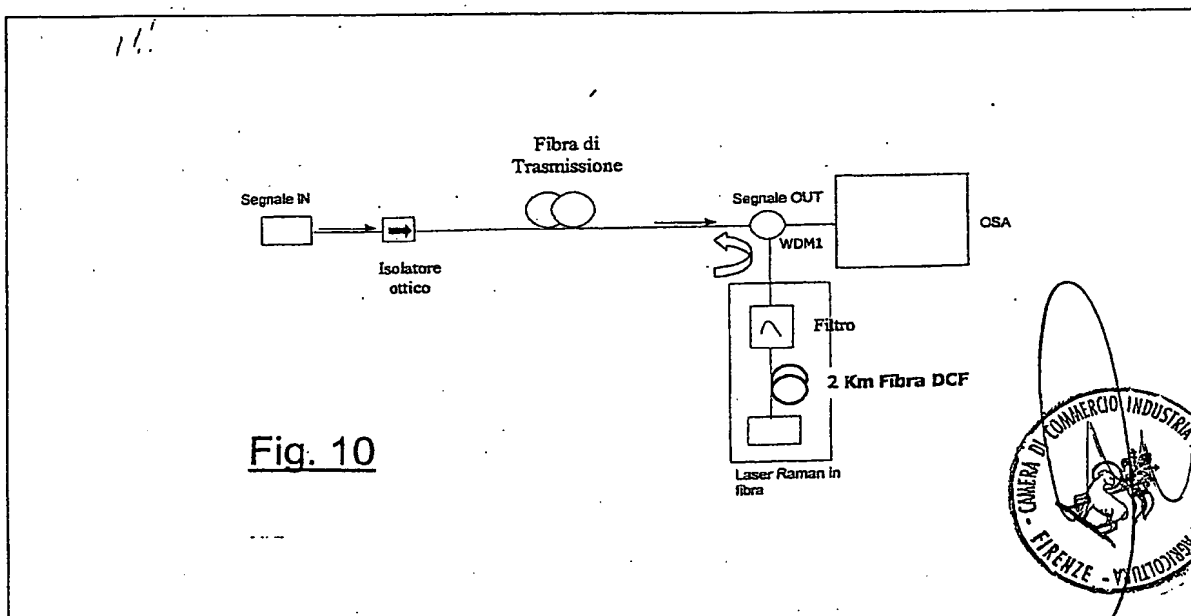
I. RIASSUNTO

L'invenzione riguarda un metodo di prevenzione del degrado del rapporto segnale su rumore in un sistema di comunicazione ottica WDM su una fibra ottica di trasmissione avente lo zero di dispersione ad una lunghezza d'onda fuori dalla banda di trasmissione impiegante almeno un amplificatore Raman distribuito a radiazione contro-propagante, comprendente almeno un laser di pompaggio generante un segnale pompa di lunghezza d'onda inferiore alla lunghezza d'onda dei segnali WDM di una certa quantità dipendente dalle caratteristiche della fibra, mezzi di accoppiamento del laser di pompaggio alla fibra all'estremità di uscita dei segnali WDM dalla fibra di trasmissione, detto metodo consistendo nel produrre una certa dispersione cromatica della radiazione laser generata dal laser di pompaggio, prima di iniettarla, in direzione contro-propagante rispetto ai segnali WDM, sulla fibra ottica di trasmissione mediante detti mezzi di accoppiamento.

(Fig. 10)



M. DISEGNO DEFINITIVO



2003 A 000117

- 2 -

BI627F

Descrizione dell'Invenzione Industriale dal titolo:

"PREVENZIONE DEL DEGRADO DELLE PRESTAZIONI IN SISTEMI DI COMUNICAZIONE OTTICA WDM IMPIEGANTI AMPLIFICAZIONE RAMAN DISTRIBUITA CONTRO-PROPAGANTE" a nome del CONSORZIO NAZIONALE INTERUNIVERSITARIO PER LE TELECOMUNICAZIONI (CNIT), con sede a Parma.

—0—0—

Ambito dell'Invenzione

La presente invenzione si riferisce a sistemi di comunicazione ottica ed in particolare a sistemi utilizzando amplificazione ottica.

Stato della tecnica

Gli attuali sistemi di comunicazione ottica WDM (a moltiplicazione di lunghezza d'onda), un cui schema semplificato è rappresentato in figura 1, consentono la trasmissione sulla medesima fibra ottica di numerosi canali modulati a diverse lunghezze d'onda. I segnali, provenienti dai trasmettitori TX, vengono aggregati nel moltiplicatore MUX, amplificati da un amplificatore di partenza in trasmissione TPA, e fatti propagare in fibra con amplificazione di linea OLA ad ogni nodo per recuperare le perdite introdotte dalla fibra stessa e da altri eventuali componenti inseriti nel sistema (compensatori di dispersione cromatica, filtri equalizzatori ecc...). Al sito terminale i canali vengono nuovamente amplificati da un amplificatore di potenza in ricezione RPA, separati gli uni dagli altri nel demoltiplicatore DEMUX ed inviati ai rispettivi ricevitori RX.

L'evoluzione di tali sistemi va nella direzione di un continuo aumento della loro capacità di trasmissione (maggior numero di canali WDM, frequenze di cifra più

Mauro Luigi Bardini
(Società Italiana Brevetti S.p.A.)
iscritto all'Albo con il n. 223

elevate) e verso la possibilità di coprire a livello ottico, cioè senza conversione elettro-ottica, distanze sempre maggiori.

In tale ambito si inserisce l'amplificazione Raman ed in particolare l'amplificazione Raman distribuita. Mentre gli amplificatori ottici indicati in Fig. 1 sono amplificatori concentrati, tipicamente amplificatori in fibra drogata con erbio (EDFA), gli amplificatori Raman distribuiti utilizzano la fibra di trasmissione come mezzo amplificatore. Uno schema a blocchi di sistema WDM basato su EDFA ed amplificazione Raman distribuita è riportato in Fig. 2. L'amplificazione Raman è ottenuta mediante trasferimento di potenza da un laser di pompa RP ai segnali; sebbene l'amplificazione possa essere ottenuta pompando ad opportune lunghezze d'onda sia in direzione co-propagante che contro-propagante rispetto alla direzione di propagazione dei segnali WDM, l'amplificazione contro-propagante è meno problematica in termini di rumore trasferito dalla pompa ai segnali ed è quella tipicamente utilizzata negli attuali sistemi commerciali.

Esistono vari tipi di fibre di trasmissione:

- G652: dette anche SFM con zero di dispersione a circa 1300 nm e dispersione a 1550 nm di circa 15 ps/km nm (dove si allocano tipicamente i canali WDM perché a 1550 nm si ha il minimo dell'attenuazione della fibra di silice)
- G653: dette anche DSF (dispersion shifted fiber) con zero di dispersione a 1550 nm. Sono poco adatte a trasmissione WDM a 1550 nm perché la bassa dispersione a 1550 nm aumenta l'interazione nonlineare fra i canali WDM
- G655: dette anche NZ-DSF (non zero dispersion shifted fibers) hanno lo zero di dispersione non in banda cioè a 1550 nm ma nemmeno a 1300 nm come nel caso delle G652. Tra questi si possono citare le seguenti:

TW-RS: con zero a 1450 nm (OFS)

TW-CLASSIC con zero a 1515 nm (OFS)

TW-PLUS con zero a 1530 nm (OFS)

E-LEAF con zero a 1500 nm (CORNING)

FREE-LIGHT con zero a 1500 nm (PIRELLI)

Per fibre di trasmissione in silice, utilizzate negli attuali sistemi di comunicazioni ottiche, il massimo del guadagno Raman si ha per una differenza in frequenza fra pompa e segnali di circa 13 THz (con pompa a lunghezza d'onda inferiore rispetto ai segnali).

Tale amplificazione migliora il rapporto segnale/rumore (OSNR) all'uscita del sistema, consente di ridurre penalità dovute a fenomeni di propagazione non-lineare in fibra ed è quindi utile per aumentare la capacità di trasmissione del sistema e la massima distanza raggiungibile senza ricorrere a conversione elettro-ottica.

Tuttavia, sebbene meno problematica dell'amplificazione Raman co-propagante, anche quella contro-propagante, in particolari condizioni e con particolari caratteristiche della fibra di trasmissione, può indurre serie penalità, soprattutto quando, in presenza di collegamenti molto lunghi fra due siti di linea, si cerca di aumentare la potenza del laser di pompa per fornire maggior guadagno ai segnali e quindi assicurare buone prestazioni al sistema.

In generale il problema di degrado del rapporto segnale su rumore con pompaggio Raman contro-propagante si ha quando lo zero di dispersione della fibra è simmetrico fra pompa e segnale (o in altre parole quando la dispersione cromatica sulla radiazione laser di pompa e sul segnale è la stessa in valore assoluto: in tali condizioni l'ASE - sotto a tali segnali viaggia con la stessa velocità di gruppo della pompa e quindi viene sporcata in modo efficiente dalla pompa).



In pratica i segnali WDM per sistemi che utilizzano sia amplificatori EDFA che Raman distribuito contro-propagante possono essere allocati in banda convenzionale dell'EDFA (da 1530 a 1560 nm) o in banda estesa dell'EDFA (da 1570 a 1600 nm.)

Considerando che le pompe Raman devono essere posizionate circa 100 nm sotto a quelle dei canali WDM avremo in prima approssimazione che le pompe Raman per sistemi che utilizzano EDFA in banda convenzionale (1530-1560 nm) saranno nella zona 1430-1460 nm, mentre per sistemi con EDFA in banda estesa (1570-1600 nm) le pompe saranno da 1470 nm a 1500 nm.

Si osserva quindi che specialmente per le fibre cosiddette NZ-DS lo zero di dispersione può essere fra la radiazione laser di pompaggio e i segnali WDM convenzionali.

Nelle fibre di trasmissione di tipo G655, la lunghezza d'onda corrispondente allo zero di dispersione cromatica della fibra può infatti risultare posizionata simmetricamente rispetto alle lunghezze d'onda della pompa e dei segnali WDM (condizioni di risonanza). In tali condizioni la pompa è in grado di trasferire con molta efficacia rumore ai segnali, nonostante la radiazione laser di pompa sia contro-propagante, attraverso diversi meccanismi che verranno illustrati in seguito.

I meccanismi fisici alla base del trasferimento di rumore da pompa a segnali in caso contro-propagante sono complessi; occorre considerare che l'amplificazione Raman, oltre che amplificare i segnali introduce anche rumore di emissione spontanea amplificata (ASE) che si propaga in entrambe le direzioni lungo la fibra di trasmissione (ASE+ co-propagante coi segnali ed ASE- contro-propagante rispetto ai segnali). Inoltre l'amplificazione Raman distribuita genera un'altra importante causa di rumore legata a fenomeni di retro-diffusione di Rayleigh (back-scattering) subiti sia

dai segnali che dall'ASE. La presenza di interazioni non lineari fra radiazione di pompa ed emissione spontanea amplificata co-propagante rispetto alla pompa (ASE-) ed il trasferimento del rumore di intensità (RIN) della pompa all'emissione spontanea complicano ulteriormente il meccanismo.

In sintesi, il fenomeno che degrada le prestazioni dell'amplificatore distribuito in condizioni di risonanza è legato alla efficiente interazione nonlineare di guadagno parametrico fra la radiazione di pompa e l'emissione spontanea che si propaga nella stessa direzione della pompa (ASE-), dovuta proprio alla condizione di risonanza (il guadagno parametrico è un fenomeno nonlineare di interazione di four-wave-mixing risonante). Tale ASE- viene enormemente amplificata nella zona di risonanza, cioè per lunghezze d'onda simmetriche rispetto alla pompa dalla parte opposta dello zero di dispersione della fibra. L'interazione nonlineare di guadagno parametrico fa crescere eccessivamente l'ASE- in tale zona spettrale (bump) tanto più quanto più alto è il guadagno Raman e quindi la pompa utilizzata; l'ASE- che viaggia nella direzione della pompa viene retrodiffusa ed amplificata di nuovo dalla pompa dando luogo ad accumulo di emissione spontanea co-propagante ASE+ esattamente nella zona spettrale dei segnali, degradando il loro rapporto segnale/rumore.

Oltre a tale fenomeno, esiste un altro meccanismo che degrada le prestazioni in condizioni di risonanza, legato alla retro-diffusione doppia (DRS) del segnale; la singola retro-diffusione del segnale si propaga nello stesso verso della pompa e quindi può subire amplificazione parametrica oltre che amplificazione Raman. La doppia retro-diffusione subisce ulteriore amplificazione Raman e crea diafonia (cross-talk) per il segnale stesso.

Tali fenomeni sono particolarmente limitanti quando il laser di pompa utilizzato ha una banda relativamente stretta (inferiore ad 1 nm) e viene utilizzato ad elevata

potenza in condizioni di risonanza. Anche le caratteristiche di rumore di intensità del laser (RIN) possono influire su tale fenomeno ma in misura inferiore. I tipici laser Raman in fibra, utilizzati per la loro elevata potenza disponibile a basso costo, soffrono seriamente dei problemi descritti.

Scopi e sintesi dell'Invenzione

E' importante trovare sistemi e metodi per potere sfruttare efficacemente l'amplificazione Raman contro-propagante anche in condizioni di risonanza senza subire gli inconvenienti e penalizzazioni dovute ai fenomeni sopra descritti.

E' anche auspicabile trovare metodi e sistemi che consentano di realizzare un elevato guadagno Raman in tali condizioni critiche, evitando le penalità descritte così da sfruttare pienamente l'elevata potenza ed il basso costo dei laser Raman in fibra.

Altri tipi di sorgenti di pompa, come per esempio i laser Fabry-Perot, multiplati in polarizzazione (o depolarizzanti) aventi una banda più estesa rispetto ai laser Raman in fibra e con RIN più basso danno luogo a penalità inferiori in condizioni di risonanza, ma non consentono di ottenere guadagni elevati come quelli raggiungibili utilizzando laser Raman in fibra, necessari soprattutto in presenza di tratte lunghe, caratterizzate da elevate perdite di potenza sui segnali WDM. Tuttavia anche nel caso di impiego di queste sorgenti laser alternative di pompaggio, i sopradescritti fenomeni di degrado del rapporto segnale/rumore sussistono.

È stato ora trovato un modo efficace quanto semplice da attuare per prevenire il degrado del rapporto segnale su rumore derivante dall'impiego di un amplificatore Raman distribuito contro-propagante.

Fondamentalmente si è trovato che producendo deliberatamente una certa dispersione cromatica del segnale generato dal laser di pompaggio, prima di iniettarlo in direzione contro-propagante rispetto ai segnali WDM sulla fibra ottica di

trasmissione, si può determinare una scorrelazione di fase tra i modi longitudinali della radiazione laser di pompa, sufficiente ad annullare i sopra descritti fenomeni di risonanza.

Naturalmente, l'entità della dispersione cromatica introdotta sulla radiazione laser di pompa è limitata al minimo necessario ad annullare il picco di amplificazione dell'ASE- per lunghezze d'onda simmetriche rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione laser di pompa, dalla parte opposta dello zero di dispersione nella fibra di trasmissione e quindi anche della radiazione spontanea nell'ASE+, a causa dei meccanismi sopra descritti.

L'invenzione è precisamente definita nelle annesse rivendicazioni 1, 5, e 16, mentre forme di realizzazione particolarmente efficaci sono definite in relative rivendicazioni dipendenti.

Breve descrizione dei disegni

I diversi aspetti e vantaggi dell'invenzione risulteranno ancor più evidenti dalla seguente descrizione di alcune forme realizzative esemplificative e non limitative facendo riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- la figura 1 mostra schematicamente un sistema di comunicazione ottica WDM secondo la tecnica nota;
- la figura 2 mostra schematicamente un sistema di comunicazione ottica WDM con amplificazione Raman distribuita contro-propagante secondo la tecnica nota;
- la figura 3 illustra uno schema di pompaggio Raman contro-propagante con laser Raman in fibra;
- la figura 4 illustra schematicamente le direzioni di propagazione del segnale, della pompa, dell'ASE+, dell'ASE- e delle radiazioni di retro- e doppia retro-diffusione dei segnali;



- la figura 5 mostra gli spettri ASE- e ASE+ con potenza di pompa pari a 500mW (laser Keopsys);

- la figura 6 mostra gli spettri ASE+ all'uscita della fibra al crescere della potenza di pompa (laser Keopsys);

- la figura 7 mostra gli spettri ASE+ all'uscita della fibra al crescere della potenza di pompa (laser IPG Fibertech);

- la figura 8 illustra la cifra di rumore equivalente in funzione della potenza di pompa;

- la figura 9 illustra la cifra di rumore equivalente in funzione di G_{on-off} avvicinandosi alle condizioni di risonanza;

- la figura 10 illustra schematicamente una prima forma realizzativa del sistema di amplificazione Raman contro-propagante secondo l'invenzione;

- la figura 11 illustra schematicamente una seconda forma realizzativa del sistema di amplificazione Raman contro-propagante secondo l'invenzione;

- la figura 12 illustra schematicamente una terza forma realizzativa del sistema di amplificazione Raman contro-propagante secondo l'invenzione;

- la figura 13 mostra graficamente le prestazioni in termini di NF del sistema secondo la figura 3 (tecnica nota) e dei sistemi secondo l'invenzione di cui alle figure 10 e 11;

- la figura 14 mostra graficamente le prestazioni in termini di S/N del sistema secondo la figura 3 (tecnica nota) e dei sistemi secondo l'invenzione di cui alle figure 10 e 11;

- la figura 15 illustra gli spettri di uscita per i sistemi di cui alla figura 3 (tecnica nota) e secondo l'invenzione di cui alla figura 10 con otto segnali WDM in ingresso;

- la figura 16 mostra graficamente un confronto di S/N in funzione del guadagno on-off per il sistema secondo la figura 3 (tecnica nota) e quello secondo l'invenzione di cui alla figura 10;

- la figura 17 mostra graficamente un confronto tra gli spettri ASE+ e DRS per il sistema secondo la figura 3 (tecnica nota) e quello secondo l'invenzione di cui alla figura 10;

- la figura 18 mostra schematicamente un sistema di amplificazione Raman contro-propagante con laser di pompa a due lunghezze d'onda;

- la figura 19 mostra schematicamente una variante realizzativa secondo l'invenzione del sistema di figura 18 con sfasatori di modi sui due rami di pompa.

Descrizione dettagliata dell'Invenzione

Per meglio comprendere l'invenzione è utile preliminarmente analizzare in maggior dettaglio un sistema di comunicazione ottica e qualificarne le peculiarità e problemi.

In figura 3 è rappresentato uno schema generale di amplificatore Raman distribuito con pompaggio contro-propagante. Segnali WDM e pompa si propagano in direzioni opposte lungo la fibra di trasmissione. La radiazione di pompa, generata a lunghezze d'onda inferiori rispetto a quelle dei segnali (circa 100 nm più in basso) può essere a singola lunghezza d'onda oppure anch'essa ottenuta moltiplicando più radiazioni laser a lunghezze d'onda diverse, al fine di allargare la banda di guadagno fornita dall'amplificatore Raman.

A titolo di esempio, nel seguito considereremo il caso più critico di pompaggio Raman a singola lunghezza d'onda utilizzando a tal scopo un laser Raman in fibra come sorgente della radiazione laser di pompa.

Come già detto, queste sorgenti di pompa forniscono elevata potenza in uscita (sino a diversi W), sono caratterizzate da larghezze di riga inferiori ad 1 nm e rumore d'intensità (RIN) tipicamente dell'ordine di -110 dB/Hz. Lo spettro della sorgente è inoltre costituito da numerosissimi modi longitudinali, a banda molto stretta (tipicamente centinaia di KHz) e separazione tipicamente dell'ordine dei MHz.

La radiazione di pompa è a basso grado di polarizzazione (inferiore al 10 %) e viene accoppiata nella fibra di trasmissione mediante un circolatore ottico o mediante un accoppiatore ottico.

La figura 4 descrive schematicamente le direzioni di propagazione della pompa, dei segnali, dell'ASE+, dell'ASE- e delle radiazioni dovute a retro-diffusione sia dell'ASE- che doppia retro-diffusione dei segnali.

Si consideri un laser Raman in fibra (Keopsys) a singola lunghezza d'onda (1443 nm) per amplificazione Raman distribuita contro-propagante di segnali WDM nella banda convenzionale degli EDFA, secondo lo schema di Fig. 3. La fibra di trasmissione è di tipo G.655 (Pirelli Free-Light) con zero di dispersione cromatica a circa 1500 nm.

La condizione di risonanza è quindi prevista a lunghezze d'onda centrate intorno a 1558 nm.

Mediante analizzatore di spettro ottico sono state studiate le caratteristiche spettrali dell'ASE- ed ASE+ generate nella fibra di trasmissione.

La figura 5 confronta gli spettri ASE- ed ASE+ ad una certa potenza di pompa (500mW). Notare che l'ASE+ viene misurata all'uscita della fibra e l'ASE- all'ingresso.

E' evidente la presenza di un accumulo di spontanea ASE- in corrispondenza della risonanza. Meno evidente, ma presente, è l'effetto di questo eccessivo accumulo

di spontanea nell'ASE+. Ciò è dovuto al fatto che l'accumulo eccessivo di ASE- nella zona di risonanza è generato direttamente dall'interazione diretta di tale spontanea con la pompa; l'aumento di ASE+ intorno alla risonanza è invece dovuto a retro-diffusione e nuova amplificazione dell'ASE-, fenomeno che appare via via più evidente aumentando il guadagno Raman.

La figura 6 mostra gli spettri di ASE+ all'aumentare della potenza di pompa accoppiata in fibra; è evidente come l'accumulo di ASE+ in risonanza aumenti sensibilmente con la potenza di pompa e quindi con il guadagno Raman.

L'esperimento è stato ripetuto con laser Raman in fibra di un altro fornitore (IPG Fibertech) con lunghezza d'onda di emissione a 1450 nm. In tal caso, come evidenziato in figura 7, lo spettro di ASE+ al crescere della potenza di pompa presenta un accumulo (bump) intorno a 1550 nm.

La penalità indotta in un sistema di comunicazione ottica da un fenomeno di questo tipo può essere ben evidenziata analizzando la cifra di rumore equivalente (NF) dell'amplificatore Raman distribuito, definita come:

$$NF = 10 \log \left(\frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \right) = 10 \log \left(\frac{P_{ASE+}}{h \nu \Delta \nu G_{on-off}} \right)$$

Ove SNR_{in} ed SNR_{out} sono i rapporti segnale/rumore ottico all'ingresso ed alla uscita dell'amplificatore, P_{ASE+} è la potenza di ASE+ all'uscita in una banda di frequenza $\Delta \nu$, h è la costante di Plank, ν è la frequenza del segnale e G_{on-off} è il guadagno on-off dell'amplificatore Raman, definito come rapporto fra la potenza di segnale in uscita a pompa accesa e la potenza di segnale in uscita a pompa spenta



(notare che il guadagno netto tipicamente utilizzato negli amplificatori concentrati è definito come il rapporto fra la potenza d'uscita e quella d'ingresso del segnale).

La NF per un amplificatore Raman distribuito può essere negativa e l'amplificatore è tanto migliore in termini di caratteristiche di rumore quanto più la NF è bassa.

Analizzando la NF di un amplificatore distribuito contro-propagante in funzione della potenza di pompa lanciata in fibra (o del guadagno Raman) si ha il tipico andamento rappresentato in figura 8.

La NF scende al crescere della potenza di pompa fino ad un valore ottimo al di sopra del quale ricomincia a salire a causa di fenomeni di retro-diffusione dell'ASE- che, nuovamente amplificata si somma all'ASE+ aumentandola e quindi degradando la NF dell'amplificatore. Tale effetto si verifica a prescindere dalla presenza di condizioni di risonanza ed è intrinseco dell'amplificazione Raman distribuita contro-propagante. Ovviamente il valore di potenza a cui si comincia a notare l'aumento di NF varia da fibra a fibra e dipende in particolare dal coefficiente di retro-diffusione di Rayleigh e dall'area efficace della fibra considerata.

In presenza di risonanza, l'effetto descritto in figura 8 risulta essere maggiore e la NF comincia a salire in funzione della potenza di pompa (o guadagno on-off) tanto prima quanto più ci si avvicina con il segnale alla lunghezza d'onda di massima risonanza.

Ciò è evidenziato in figura 9, nella quale viene riportata la NF in funzione del guadagno on-off per lunghezze d'onda del segnale che si avvicinano gradualmente alla risonanza a 1550 nm.

In presenza di risonanza anche la doppia retro-diffusione (DRS) del segnale viene esasperata del trasferimento di rumore dalla pompa alla singola retro-diffusione

del segnale mediante guadagno parametrico. E' tuttavia sperimentalmente difficile misurare la potenza di DRS del segnale in risonanza perché tale potenza si confonde nell'eccessiva crescita dell'ASE+.

Si vedrà in seguito come la soluzione proposta per evitare l'accumulo di ASE+ in risonanza, e quindi il degrado di NF, sia efficace anche nel ridurre potenziali penalità dovute a DRS del segnale.

E' da notare che un aumento di DRS del segnale comporta inevitabilmente degrado delle prestazioni perché tale DRS deve essere considerato come una diafonia per il segnale (cross-talk).

Dall'analisi delle caratteristiche spettrali di emissione di un tipico laser Raman in fibra si deduce che lo spettro della radiazione utilizzata come pompa è costituito da un numero molto elevato di modi longitudinali a riga molto stretta (centinaia di KHz) e spaziatura dell'ordine dei MHz. Tali modi longitudinali risultano inoltre caratterizzati da forte coerenza o, in altri termini, da una ben definita relazione di fase, per il fatto stesso di essere generati dalla medesima cavità laser. Tale caratteristica fa sì che l'interazione nonlineare che fornisce guadagno parametrico ai fotoni di ASE- che si trovano in condizioni di risonanza (cioè a lunghezze d'onda simmetriche rispetto allo zero di dispersione ed alla lunghezza d'onda di pompa) sia particolarmente efficiente. Agendo in modo opportuno sulla radiazione di pompa emessa dal laser Raman in fibra è possibile distruggere la relazione di fase che caratterizza i modi longitudinali costituenti la radiazione di pompa e, di conseguenza, notevolmente ridurre l'efficienza del guadagno parametrico subito dai fotoni di ASE- in risonanza. Ciò si traduce direttamente in una drastica riduzione dell'accumulo di ASE+ dovuto alla retro-diffusione dell'ASE- nella zona spettrale di risonanza ove possono essere allocati canali WDM. Ne consegue quindi che la NF dell'amplificatore risulta essere degradata

ad elevate potenze di pompa in maniera spettralmente uniforme solo a causa della retro-diffusione dell'ASE- generata per amplificazione Raman (si veda la figura 8) e non aumentata in condizioni di risonanza dal guadagno parametrico.

Qui di seguito vengono descritte, a titolo di esempio, tre possibili forme realizzative dell'invenzione.

Esempio 1: laser Raman in fibra con elemento dispersivo

La figura 10 riporta una schema ottico dettagliato della prima realizzazione sperimentale proposta. Lo schema dell'amplificatore Raman contro-propagante considerato, differisce da quello descritto precedentemente in figura 3 per la presenza, fra l'uscita del laser Raman in fibra e l'ingresso di pompa del circolatore (o accoppiatore), di un elemento dispersivo che può tipicamente essere un breve tratto di fibra (o altro componente) che introduca una opportuna dispersione cromatica alla lunghezza d'onda di pompa. Tale fibra può essere per esempio fibra per compensazione della dispersione cromatica (DCF) o fibra standard per telecomunicazioni di tipo G.652 (SMF).

Secondo questa forma realizzativa può essere utile introdurre anche un filtro in cascata all'elemento dispersivo costituito da una ragguardevole lunghezza di una fibra standard o di compensazione cromatica atta a bloccare la potenza di emissione spontanea prodotta per effetto Raman nell'elemento dispersivo stesso.

Altro componente utile per introdurre dispersione cromatica può essere una fibra a reticolo (grating) per compensazione della dispersione cromatica. In ogni caso, sarà necessario introdurre una quantità minima di dispersione totale sulla radiazione di pompa, sufficiente per sfasare e scorrelare opportunamente i modi di pompa emessi dal laser in fibra.

La propagazione dei modi di pompa nell'elemento dispersivo prima di essere accoppiata nella fibra di trasmissione in direzione contro-propagante rispetto ai segnali, svolge l'operazione di sfasamento descritta nel paragrafo precedente e che sta alla base dell'invenzione. In sostanza, distruggendo la relazione di fase fra i modi longitudinali del laser di pompa, la fibra DCF/SMF (o altro componente) riduce sostanzialmente l'efficienza di guadagno parametrico subito dai fotoni di ASE- prossimi alla risonanza durante la propagazione in fibra di trasmissione.

La presenza di un opportuno elemento dispersivo, inserito prima di accoppiare la radiazione di pompa in fibra, fa sì che i prodotti di four-wave-mixing (FWM) generati ad una data frequenza nella zona di risonanza da coppie diverse di modi longitudinali del laser (l'amplificazione parametrica non è altro che una interazione di FWM risonante) si sommino non in fase ma in potenza. In altri termini se per esempio N coppie di modi di pompa equispaziati in frequenza, caratterizzati dalla stessa potenza ottica per modo, generano ognuno un prodotto di FWM alla stessa frequenza nella zona risonante, il prodotto totale di FWM (e quindi di rumore) a tale frequenza sarà in un caso N volte quello dovuto alla singola coppia di modi longitudinali mentre, senza elemento dispersivo, il prodotto totale potrà avere nel caso peggiore un valore pari a N^2 volte quello dovuto alla singola coppia di modi.

L'effetto ottenuto, come verrà evidenziato in seguito confrontando le prestazioni degli schemi proposti con quello originario di figura 3, è la pressoché totale soppressione del bump di spontanea ASE+ in condizioni di risonanza anche a guadagni Raman on-off molto alti, e di conseguenza l'eliminazione della penalità di NF (o degrado di SNR in uscita dall'amplificatore). Notevole è anche l'effetto di riduzione di diafonia dovuta a DRS.



Tenendo conto che la dispersione cromatica tipica di fibre DCF alla lunghezza d'onda di pompa è tipicamente molto più alta in valore assoluto di quella tipica di fibre SMF, sono necessari tratti di fibra DCF di lunghezza inferiore rispetto al caso di SMF. Tuttavia la perdita in potenza più elevata della fibra DCF rispetto alla SMF potrebbe rendere più conveniente l'utilizzo di quest'ultima. Come regola generale la dispersione totale minima in modulo introdotta deve essere non inferiore a 20 ps/nm.

E' da notare che la dispersione totale introdotta dell'elemento dispersivo non dovrà essere inferiore ad un dato valore minimo ma anche non superiore ad un dato valore massimo per evitare che fenomeni di risonanza riportino in fase fotoni di pompa dando luogo ad efficiente amplificazione parametrica dell'ASE-.

Esempio 2: laser Raman in fibra con linea di ritardo fra due accoppiatori
50:50

La figura 11 riporta la schema ottico dettagliato della seconda realizzazione sperimentale dell'invenzione. L'elemento dispersivo presente in figura 10 è sostituito da due accoppiatori ottici a 3 dB (rapporto di splitting 50:50) che prima separano e poi ricombinano la radiazione di pompa, e da una linea di ritardo sui uno dei due rami fra gli accoppiatori, la cui lunghezza deve essere superiore alla lunghezza di coerenza del laser Raman in fibra utilizzato come pompa (i risultati sperimentali sono stati ottenuti con 250 metri di fibra G.653, DSF).

L'effetto sulla radiazione di pompa può essere ricondotto a quello della prima realizzazione, con l'unica differenza che lo sfasamento fra i modi ora è ottenuto con perdita maggiore sulla pompa (tipicamente fra 3 e 4 dB, mentre nel caso precedente può essere inferiore a 1,5 dB).

Esempio 3: laser Raman in fibra con linea di ritardo fra combinatore e divisore di polarizzazione

La figura 12 riporta la schema ottico dettagliato della terza realizzazione sperimentale dell'invenzione. La radiazione di pompa viene separata nelle sue componenti a polarizzazione ortogonale; una delle due componenti viene ritardata da una fibra con lunghezza superiore alla lunghezza di coerenza della sorgente, e poi le due radiazioni sono ricombinate ed accoppiate in fibra di trasmissione in direzione contro-propagante rispetto ai segnali.

Anche in questo caso l'effetto sulla radiazione di pompa può essere ricondotto a quello della prima realizzazione. Anche la perdita introdotta sulla pompa è dell'ordine di 1 dB come nella prima realizzazione.

Analisi e confronto delle prestazioni per le tre diverse forme di realizzazione sopra descritte

La figura 13 riporta un confronto, a parità di guadagno Raman, fra le prestazioni spettrali di NF in prossimità della condizione di risonanza per lo schema di amplificatore Raman originario (Fig. 3) e due delle tre realizzazioni sperimentali proposte nel presente brevetto (figure 10 e 11). E' evidente che l'effetto dell'elemento dispersivo e della linea di ritardo fra i due accoppiatori elimina pressoché totalmente l'aumento di NF invece presente in assenza di tali accorgimenti.

Lo stesso tipo di confronto è stato anche fatto in termini di rapporto segnale/rumore, come evidenziato in figura 14.

E' evidente che le realizzazioni proposte migliorano tale rapporto di circa 7 dB eliminando praticamente del tutto il degrado di prestazioni presente in risonanza utilizzando un semplice laser Raman in fibra.

Sono poi state confrontate le prestazioni degli schemi di figure 3 e 10, utilizzando come sorgente non un singolo segnale in ingresso ma 8 segnali multiplati in lunghezza d'onda. La figura 15 mostra chiaramente come la presenza dell'elemento dispersivo migliori efficacemente il rapporto segnale su rumore di tutti i canali prossimi alla risonanza; a parità di potenza di segnali in uscita, e quindi di guadagno Raman, la presenza dell'elemento dispersivo riduce l'emissione spontanea ASE+.

Sempre per gli schemi di figure 3 e 10, sono state confrontate le prestazioni di S/N in piena risonanza in funzione del guadagno on-off (figura 16). La presenza dell'elemento dispersivo porta ad un miglioramento di S/N pari a 10 dB in caso di guadagno Raman massimo. E' da notare che, nel caso della realizzazione proposta in figura 3, il degrado di S/N che si osserva in figura 16 è quello tipico dell'amplificatore Raman distribuito pompato in direzione contro-propagante, dovuto alla retro diffusione dell'ASE- a prescindere dalla presenza di risonanze (stesso fenomeno descritto in figura 8 in termini di degrado di NF).

La figura 17 mostra invece un confronto fra le caratteristiche di DRS misurate per gli schemi di figure 3 e 10 a parità di guadagno Raman. Gli spettri in figura sono stati ottenuti con la tecnica di estinzione nel dominio del tempo, la quale consente di misurare, mediante analizzatore di spettro ottico, sia gli spettri di ASE+ e segnali che gli spettri di ASE+ e doppia retro-diffusione dei segnali. In figura 17 sono mostrati gli spettri di ASE+ e DRS per i due schemi di amplificatori descritti nelle figure 3 e 10.

E' evidente che la presenza di un elemento dispersivo in figura 10, riduce notevolmente non solo l'accumulo di ASE+ in risonanza ma anche il DRS del segnale. E' da notare che la misura di DRS non può essere effettuata esattamente con segnale a lunghezza d'onda corrispondente alla risonanza, perché in tali condizioni il DRS è talmente allargato spettralmente da non essere più distinguibile dall'ASE+. Tuttavia, si

può notare dal confronto di figura 17 un notevole miglioramento anche in termini di DRS.

Naturalmente, l'invenzione è utilmente applicabile anche nel caso di sistemi che utilizzino più sorgenti di radiazioni laser a lunghezze d'onda diverse di pompaggio al fine di allargare la banda di guadagno fornita dall'amplificatore Raman distribuito.

Uno schema di un sistema di questo tipo è mostrato in figura 18, in cui è mostrato l'uso di due sorgenti laser di pompaggio, una a lunghezza d'onda λ_1 , l'altra a lunghezza d'onda λ_2 . Anche in questo esempio entrambe le sorgenti di radiazione laser di pompa sono laser Raman in fibra.

Le due radiazioni laser a lunghezza d'onda λ_1 e λ_2 di pompa sono multiplate nel blocco WDM DI POMPA per essere quindi immesse in direzione contro-propagante sulla fibra di trasmissione attraverso il circolatore (o accoppiatore) WDM1.

La figura 19 mostra lo schema del sistema di comunicazione ottica della figura 18 modificato secondo la presente invenzione dall'inserimento tra ciascuna sorgente di radiazione laser di pompa ad una certa lunghezza d'onda λ_1 e λ_2 , di un dispersore cromatico di sfasatura dei modi, rispettivamente per la radiazione a lunghezza d'onda λ_1 , SFASATORE DI MODI A λ_1 , e per la radiazione a lunghezza d'onda λ_2 , SFASATORE DI MODI A λ_2 , tra la rispettiva sorgente laser ed il multiplatore dei segnali di pompaggio WDM DI POMPA.

Naturalmente, i distinti "sfasatori di modi" possono essere realizzati secondo una qualsiasi delle forme di realizzazione già descritte.

Pur avendo illustrato forme particolarmente efficaci di realizzazione dell'invenzione, ipotizzando che le sorgenti di radiazione laser di pompa siano laser Raman in fibra che rappresentano l'opzione più critica, l'invenzione può essere utile a prevenire il degrado del rapporto segnale/rumore dovuto a fenomeni di risonanza

anche nel caso che la sorgente o le sorgenti di radiazione laser di pompa siano di altro tipo come ad esempio diodi laser Fabri-Perot multiplati in polarizzazione o depolarizzanti.

Negli schemi mostrati nelle figure per illustrare l'invenzione, è possibile inserire un dispositivo di estrazione della radiazione laser di pompa contro-propagante dalla fibra di trasmissione, come ad esempio un accoppiatore ottico o un circolatore, secondo comuni tecniche di realizzazione di sistemi di comunicazione ottica nel caso che sia necessario estrarre radiazione di pompa residua alla fine della tratta.

Marco Luigi Bardini
(Società Italiana Brevetti S.p.A.)
iscritto all'Albo con il n. 228



RIVENDICAZIONI

1. Metodo di prevenzione del degrado del rapporto segnale su rumore in un sistema di comunicazione ottica WDM su una fibra ottica di trasmissione avente lo zero di dispersione ad una lunghezza d'onda fuori dalla banda di trasmissione impiegante almeno un amplificatore Raman distribuito a radiazione contro-propagante, comprendente almeno un laser di pompaggio generante un segnale pompa di lunghezza d'onda inferiore alla lunghezza d'onda dei segnali WDM di una certa quantità dipendente dalle caratteristiche della fibra, mezzi di accoppiamento del laser di pompaggio alla fibra all'estremità di uscita dei segnali WDM dalla fibra di trasmissione, detto metodo consistendo nel produrre una certa dispersione cromatica della radiazione laser generata dal laser di pompaggio, prima di iniettarla, in direzione contro-propagante rispetto ai segnali WDM, sulla fibra ottica di trasmissione mediante detti mezzi di accoppiamento.
2. Il metodo della rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detto laser di pompaggio è un laser Raman in fibra.
3. Il metodo della rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che la dispersione cromatica prodotta sulla radiazione laser generata dal laser di pompaggio è di entità minima sufficiente a scorrelare tra loro in termini di fase i modi longitudinali della radiazione laser di pompa.
4. Il metodo della rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che la dispersione cromatica della radiazione laser di pompa è prodotta introducendo un elemento dispersivo tra il laser di pompaggio e detti mezzi di accoppiamento.
5. Sistema di comunicazione ottica WDM su una fibra ottica di trasmissione avente lo zero di dispersione ad una lunghezza d'onda fuori dalla banda di trasmissione comprendente almeno un amplificatore Raman distribuito, operante in contro-

propagazione rispetto ai segnali WDM trasmessi da una estremità di ingresso ad una estremità di uscita della fibra di trasmissione, e composto da almeno un laser di pompaggio generante una radiazione laser di pompa di lunghezza d'onda inferiore alla lunghezza d'onda dei segnali WDM di una certa quantità dipendente dalle caratteristiche della fibra, mezzi di accoppiamento del laser di pompaggio alla fibra ottica di trasmissione in prossimità dell'estremità di uscita dei segnali WDM dalla fibra ottica di trasmissione, caratterizzato dal fatto che comprende inoltre almeno un dispersore cromatico della radiazione laser generata da detto laser di pompaggio funzionalmente collegato tra detto laser e detti mezzi di accoppiamento.

6. Sistema secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che detto laser di pompaggio è un laser Raman in fibra.

7. Sistema secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che detto dispersore cromatico è atto a produrre una dispersione sul segnale generato da detto laser di pompaggio di entità minima sufficiente a scorrelare tra loro in termini di fase i modi longitudinali della radiazione laser di pompa iniettato sulla fibra ottica di trasmissione.

8. Sistema secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che detto dispersore cromatico è un tratto di fibra ottica con determinate caratteristiche dispersive di lunghezza sufficiente a produrre una desiderata dispersione cromatica del segnale generato da detto laser di pompaggio.

9. Sistema secondo la rivendicazione 8, caratterizzato dal fatto che detta fibra è costituita da un tratto di una fibra ottica di trasmissione di lunghezza sufficiente a produrre una dispersione totale il cui valore assoluto è compreso tra 20ps/nm e 250ps/nm.

10. Sistema secondo la rivendicazione 8, caratterizzato dal fatto che comprende inoltre un filtro tra detto tratto di fibra e detti mezzi di accoppiamento alla fibra ottica

di trasmissione, atto a bloccare l'emissione spontanea prodotta per effetto Raman in detto tratto di fibra.

11. Sistema secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che detto dispersore cromatico è composto da due accoppiatori ottici a 3dB con rapporto di ripartizione 50:50, rispettivamente primo e secondo, mutuamente accoppiati tra loro e rispettivamente all'uscita di detto laser di pompaggio e a detti mezzi di accoppiamento alla fibra ottica di trasmissione per separare e ricombinare la radiazione laser di pompa, e da una linea di ritardo su uno dei due rami del percorso ottico tra detti accoppiatori primo e secondo.

12. Sistema secondo la rivendicazione 11, caratterizzato dal fatto che detta linea di ritardo è costituita da almeno 10 metri di una fibra ottica di trasmissione, sufficiente a scorrelare i modi della radiazione laser di pompa.

13. Sistema secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che detto dispersore cromatico è composto da un divisore di polarizzazione e da un combinatori di polarizzazione mutuamente accoppiati tra loro e rispettivamente all'uscita di detto laser di pompaggio e a detti mezzi di accoppiamento alla fibra ottica di trasmissione per separare e ricombinare la radiazione laser di pompa, e da una linea di ritardo su uno dei due rami del percorso ottico tra detto divisore e detto combinatori.

14. Sistema secondo la rivendicazione 13, caratterizzato dal fatto che detta linea di ritardo è costituita da almeno 10 metri di fibra ottica di trasmissione, sufficiente a scorrelare i modi della radiazione laser di pompa.

15. Sistema secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 5 a 14, caratterizzato dal fatto che comprende più laser di pompaggio ciascuno generante una radiazione laser di pompa di una lunghezza d'onda inferiore alla lunghezza d'onda dei segnali WDM di una certa quantità dipendente dalle caratteristiche della fibra diversa da quella degli



altri laser di pompaggio, mezzi multiplatori delle diverse radiazioni laser di pompa e mezzi di iniezione in fibra delle radiazioni multiplate di pompa in prossimità dell'estremità di uscita dei segnali WDM dalla fibra di trasmissione, caratterizzato dal fatto che comprende inoltre almeno un dispersore cromatico della radiazione laser generata da ciascun laser di pompaggio funzionalmente collegato tra detto laser e detti mezzi multiplatori.

16. Amplificatore Raman distribuito operante in contro-propagazione rispetto a segnali WDM trasmessi da una estremità di ingresso ad una estremità di uscita di una fibra ottica di trasmissione, avente lo zero di dispersione ad una lunghezza d'onda fuori dalla banda di trasmissione e composto da almeno un laser di pompaggio generante una radiazione laser di pompa di lunghezza d'onda inferiore alla lunghezza d'onda dei segnali WDM di una certa quantità dipendente dalle caratteristiche della fibra, mezzi di accoppiamento del laser di pompaggio, in prossimità dell'estremità di uscita dei segnali WDM dalla fibra di trasmissione, caratterizzato dal fatto che comprende inoltre almeno un dispersore cromatico della radiazione laser generata da detto laser di pompaggio funzionalmente collegato tra detto laser e detti mezzi di accoppiamento.

17. Amplificatore Raman secondo la rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che detto laser di pompaggio è un laser Raman in fibra.

18. Amplificatore Raman distribuito secondo la rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che detto dispersore cromatico è atto a produrre una dispersione della radiazione laser generata da detto laser di pompaggio di entità minima sufficiente a scorrelare tra loro in termini di fase i modi longitudinali della radiazione laser di pompa iniettata sulla fibra ottica di trasmissione.

19. Amplificatore Raman distribuito secondo la rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che detto dispersore cromatico è un tratto di fibra ottica con determinate

caratteristiche dispersive di lunghezza sufficiente a produrre una desiderata dispersione cromatica della radiazione laser generata da detto laser di pompaggio.

20. Amplificatore Raman distribuito secondo la rivendicazione 19, caratterizzato dal fatto che comprende inoltre un filtro tra detto tratto di fibra e detti mezzi di accoppiamento alla fibra ottica di trasmissione, atto a bloccare l'emissione spontanea per effetto Raman in detto tratto di fibra.

21. Amplificatore Raman distribuito secondo la rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che detto dispersore cromatico è composto da due accoppiatori ottici a 3dB con rapporto di ripartizione 50:50, rispettivamente primo e secondo, mutuamente accoppiati tra loro e rispettivamente all'uscita di detto laser di pompaggio e a detti mezzi di accoppiamento alla fibra ottica di trasmissione per separare e ricombinare la radiazione laser di pompa, e da una linea di ritardo su uno dei due rami del percorso ottico tra detti accoppiatori primo e secondo.

22. Amplificatore Raman distribuito secondo la rivendicazione 21, caratterizzato dal fatto che detta linea di ritardo è costituita da almeno 10 metri di fibra ottica di trasmissione.

23. Amplificatore Raman distribuito secondo la rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che detto dispersore cromatico è composto da un divisore di polarizzazione e da un combinatore di polarizzazione mutuamente accoppiati tra loro e rispettivamente all'uscita di detto laser di pompaggio e a detti mezzi di accoppiamento alla fibra ottica di trasmissione per separare e ricombinare la radiazione laser di pompa, e da una linea di ritardo su uno dei due rami del percorso ottico tra detto divisore e detto combinatore.

24. Amplificatore Raman distribuito secondo la rivendicazione 23, caratterizzato dal fatto che detta linea di ritardo è costituita da almeno 10 metri di una fibra ottica di

FI 2003 A 000117.

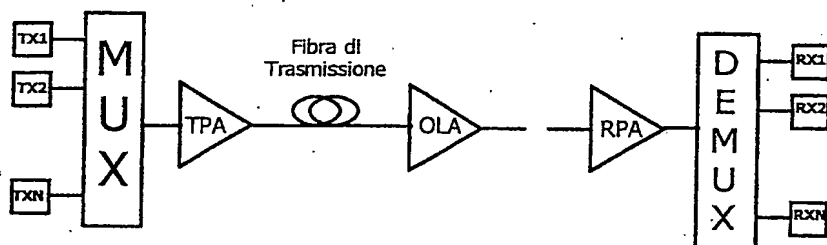


Fig. 1

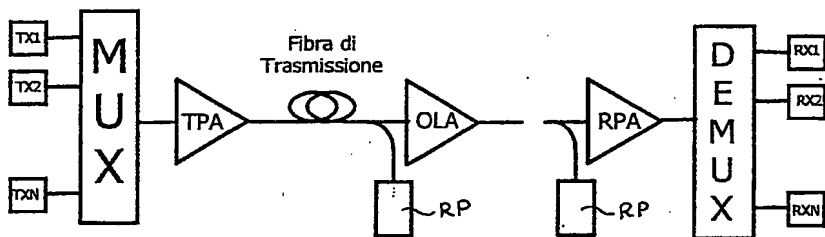


Fig. 2

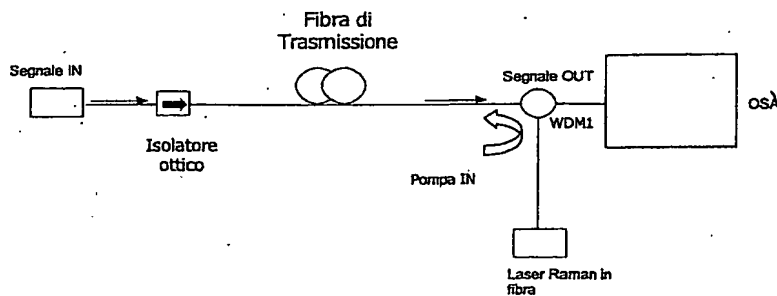


Fig. 3



Marco Luigi Bardini
(Società Italiana Brevetti S.p.A.)
Isotta att. 100 con n. 223

FI 2003 A 000117

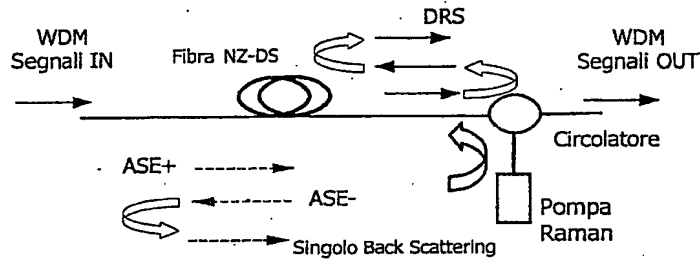


Fig. 4

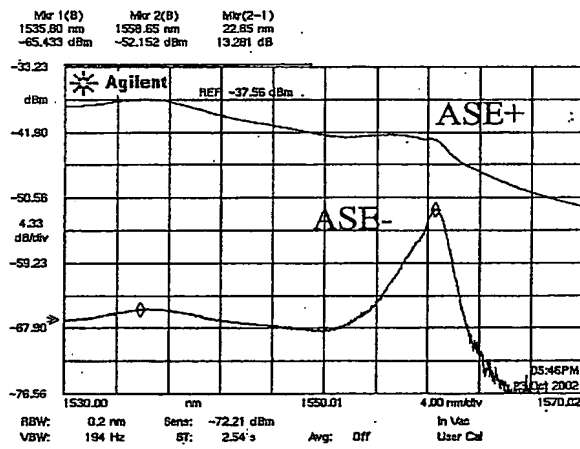


Fig. 5

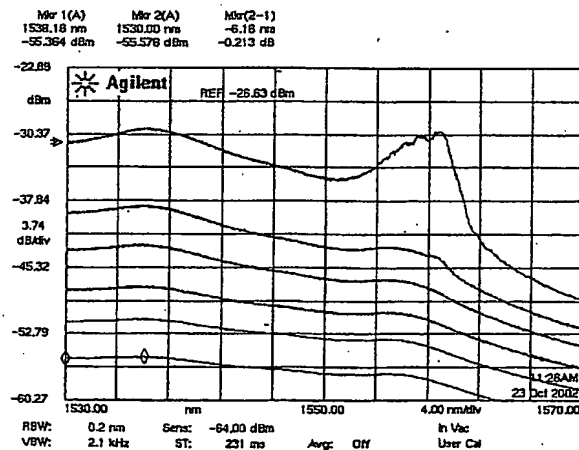


Fig. 6

Marco Luigi Bardini
 (Società a partecipazione privata S.p.A.)
 Via di San Giovanni n. 222

El 2003 A 000117

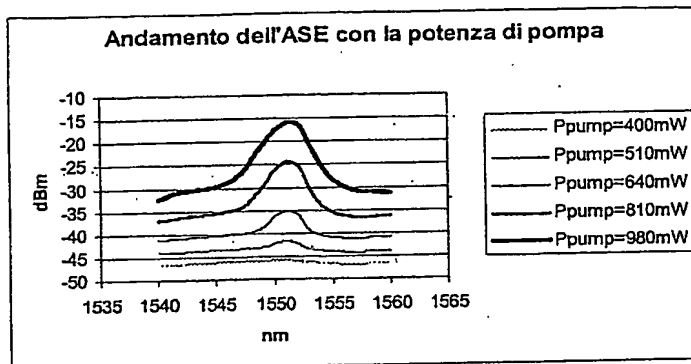


Fig. 7

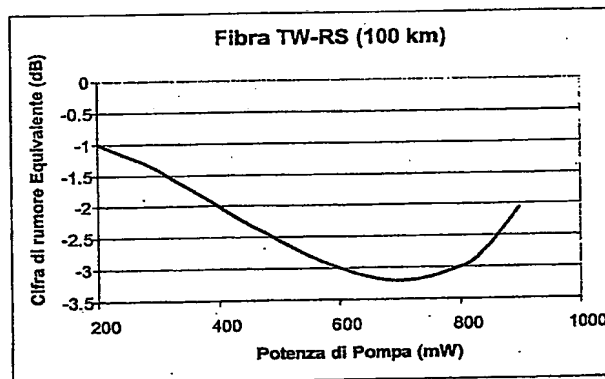


Fig. 8

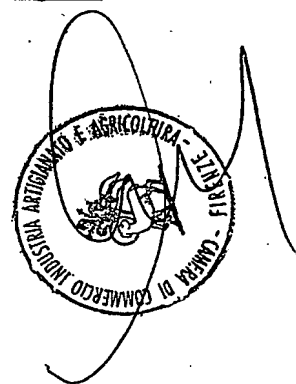
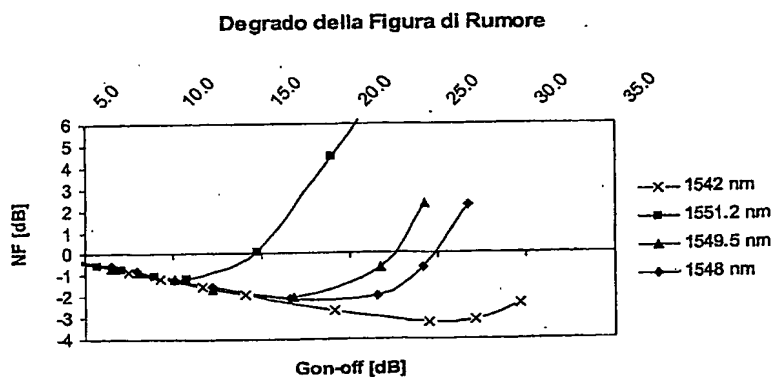


Fig. 9

Marco Luigi Bardini
(Società Interapp-Brown S.p.A.)
scritto all'Albo con il n. 223

H 2003 A 000117

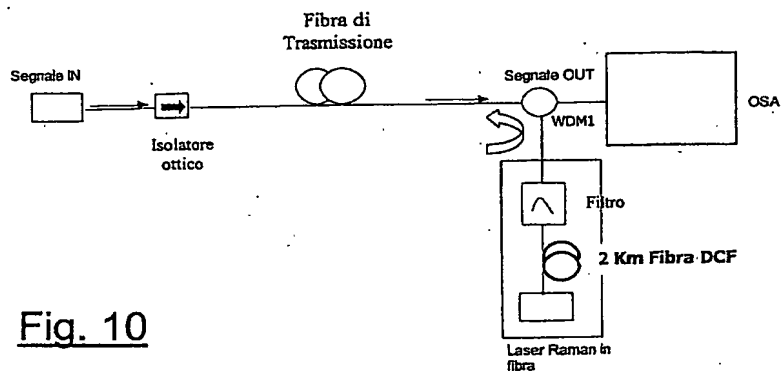


Fig. 10

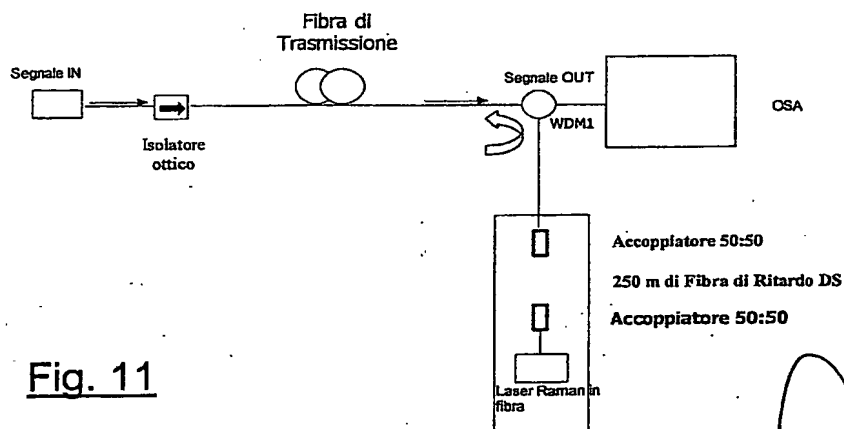


Fig. 11

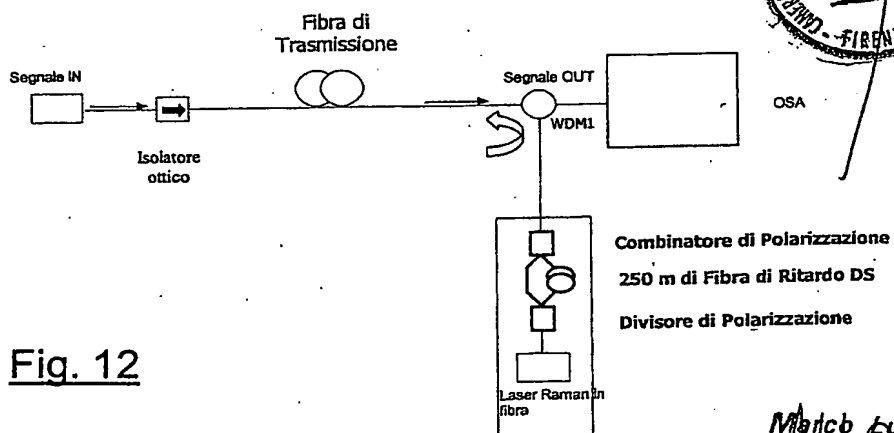
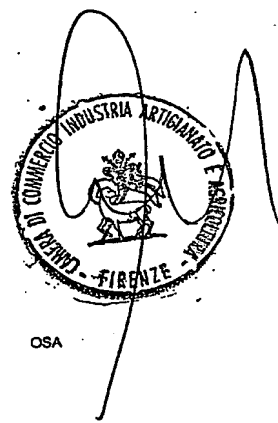


Fig. 12



Marco Luigi Bardini
(Società Italiana Brevetti S.p.A.)
Ischito al Tribunale con il n. 222

FI 2003 A 000117

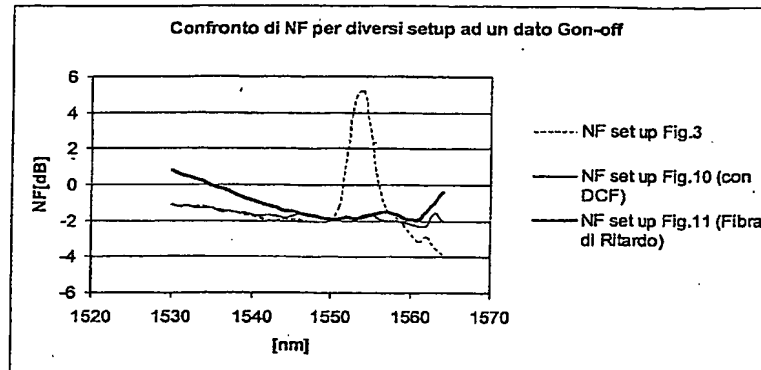


Fig. 13

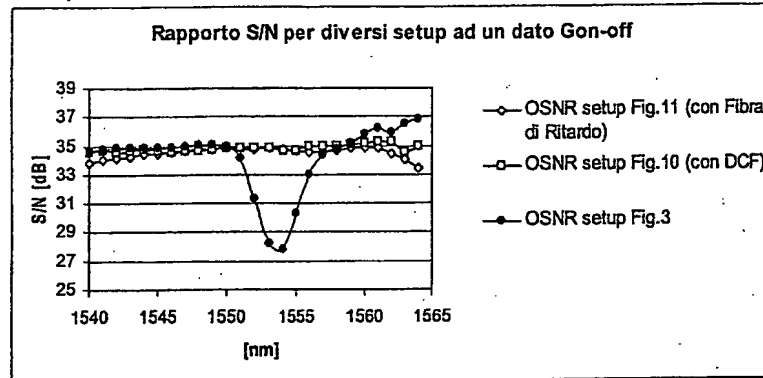


Fig. 14

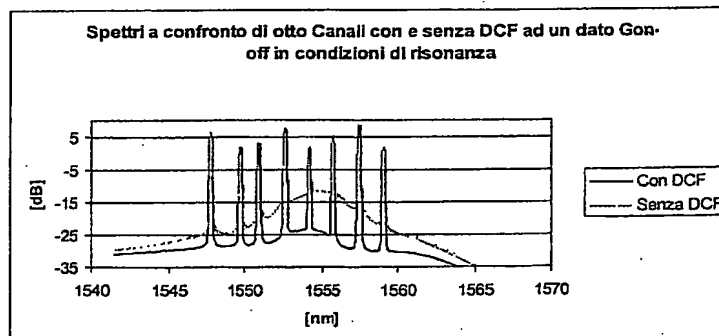
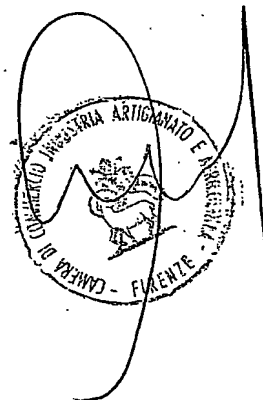


Fig. 15



Marco Luigi Bardini
(Scrittura Nazionale)

FI 2003 A 000117

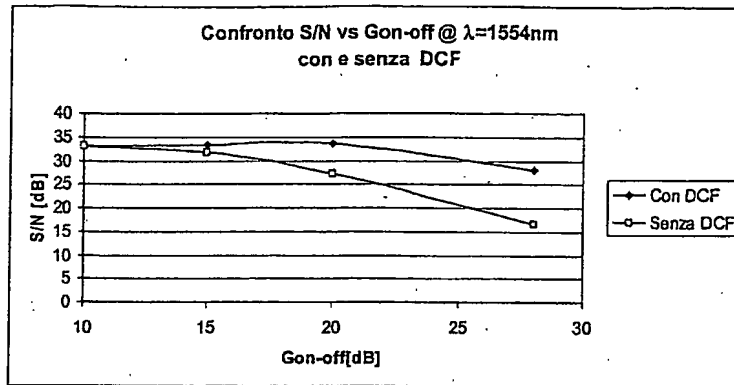


Fig. 16

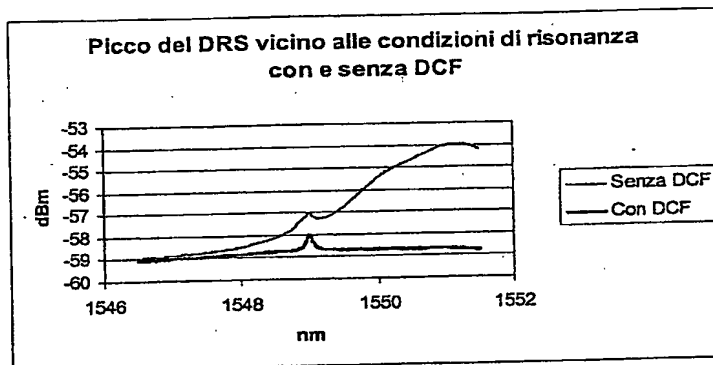


Fig. 17

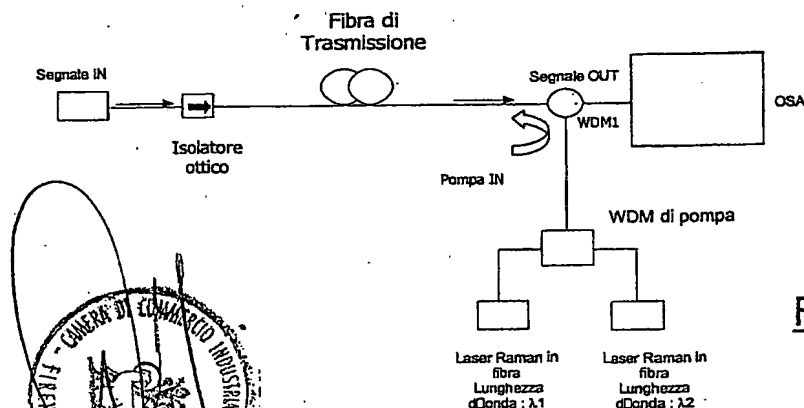
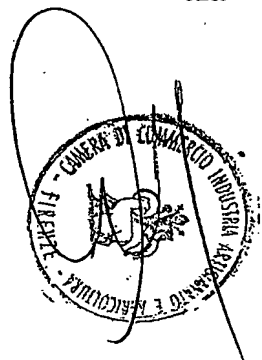


Fig. 18



Marco Luigi Bardini
(Società Italiana Brevetti S.p.A.)
iscritto all'Albo dei Consulenti

FI 2003 A 000117

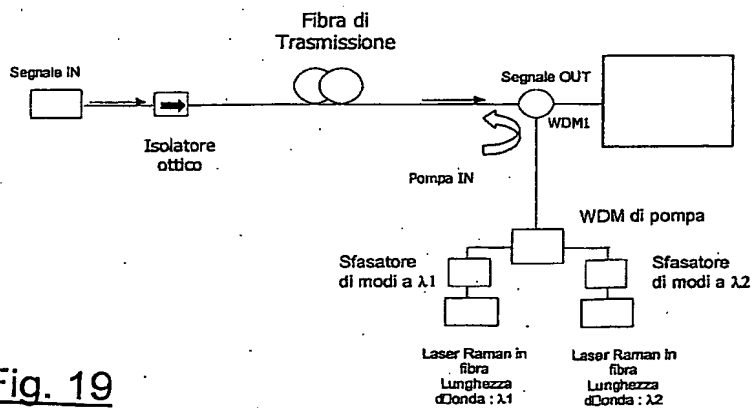
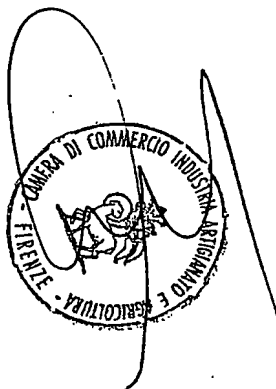


Fig. 19



Marco Luigi Bardini
 (Società Italiana Brevetti S.p.A.)
 223

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.